

基于模型的系统工程概述

朱 静, 杨 晖, 高亚辉, 姚太克
(中航工业航空动力控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

摘要: 由于航空领域涉及的系统日益高度复杂, 为更好推进基于模型的系统工程(Model Based System Engineering, MBSE) 研发体系, 通过从当前遇到的问题、推行基于模型的系统工程的必要性、优势、未来的挑战等方面进行了较为详细地阐述。基于模型的系统工程研发体系具有知识表示的无二义、系统设计的一体化、沟通交流的高效率等优势, 是未来发展的大趋势。

关键词: 系统工程; 模型; 研发体系; 航空发动机

中图分类号: V232.3 文献标识码: A doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.04.003

Summary of Model Based System Engineering

ZHU Jing, YANG Hui, GAO Ya-hui, YAO Tai-ke
(AVIC Aviation Motor Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: Since the aviation system becomes more and more complicated, in order to promote the MBSE R&D system, the model based system engineering was detailed, in terms of problems encountered presently, the necessity, advantage and future challenge of putting MBSE into practice. The MBSE R&D system has many obvious advantages, such as no ambiguity of knowledge representation, integration of the system design and high efficiency of communication etc. It is the major trend of the future development.

Key words: system engineering; model; R&D system; aeroengine

0 引言

伴随中国航空工业的发展, 航空产品经历了从机械到机械、电子到机械、电子、软件等多学科高度综合的过程, 其体系也经历了从分立式到联合式、综合式、高度综合式的发展历程。在系统体系的演变历程中, 系统功能的互操作由独立向基于共享资源的交互演进, 接口定义由功能性的聚合、松耦合向高度综合、紧耦合的方向发展, 集成工作由简单功能向更加复杂的功能发展, 系统的互联由离散向高度网络化的互联发展, 系统失效模式由透明化的简单行为向不透明的复杂综合行为发展。

目前, 在航空系统工程实施过程中, 产生的信息均是以文档的形式来描述和记录。随着近年来中国航空型号研制数量大幅度增加, 系统复杂度和规模不断提高, 跨学科、交叉学科系统的出现, 基于文档的系统工程难以保证产品数据一致性、数据的可追溯性等需求。

为了应对类似的挑战, 在国际航空领域, NASA 在原有系统工程研制模式的基础上采用了国际系统工程组织 (INCOSE) 提出的基于模型的系统工程 (Model-based Systems Engineering, MBSE) 管理新模式和实现技术。基于模型的系统工程思想是通过建立和使用一系列模型对系统工程的原理、过程和实践进行形式化控制, 通过建立系统、连续、集成、综合、覆盖全周期的模型驱动工作模式帮助人们更好地运用系统工程的原理, 大幅降低管理的复杂性, 提高系统工程的鲁棒性和精确性, 将整个系统工程作为一个技术体系和方法, 而不是作为一系列的事件。本文通过从当前遇到的问题、推行基于模型的系统工程的必要性、优势、未来的挑战等几个方面进行了较为详细的阐述。

1 TSE 的概念

传统的系统工程用各种文本文档构建系统架构, 其中的产出物是一系列基于自然语言的、以文本格式

收稿日期: 2016-03-06

作者简介: 朱静(1980), 男, 硕士, 工程师, 从事 MBSE 相关研究工作; E-mail: 25865349@qq.com。

引用格式: 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程(MBSE)概述[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 12-16. Zhu Jing, Yang Hui, Gao Yahui, et al. Summary of Model Based System Engineering[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16.

为主的文档,比如用户的需求、设计方案,当然也包括一些用实物做成的物理模型等。例如火箭的总体布局方案、推进系统、控制系统等分系统的设计方案以及弹道方案、分离方案等。把这些文档串起来的东西是一系列的术语及参数,这些术语对系统进行了定性描述。各种参数是系统的定量描述。各专业学科的分析模型从文档中抽取相关参数进行计算,计算之后再吧相关参数写入文档,转交给其它学科和相关人员。参数在各文档之间来回流动,这种设计流程也被称作抛过墙的设计。很显然,在这个过程中,文档管理的机制、配置管理的机制非常重要。总体设计的工作主要就是抓总和协调,并控制这些术语和参数。上述描述的系统工程是基于文本的系统工程(Text Based System Engineering, TSE)。TSE的文档在描述系统架构模型时具有天生的缺陷:TSE的文档是基于自然语言、基于文本形式,当然也包括少量的表格、图示、图画、照片等。由于自然语言并非专门为系统设计所发明,而是要表示大千世界的万事万物,还要表示纷繁复杂的各专业学科知识,所以TSE的文档要依靠相关工程设计的术语来使各方对系统有共同的理解和认识。所以各方的沟通交流要依赖不断更新的术语表、词汇表等,否则就容易产生理解的不一致性。尤其是当系统的规模越来越大、涉及的学科和参与的单位越来越多时,这个问题就更加突出了文档的电子化、网络化并没有从根本上改变各方对文档理解的不一致性。

随着信息技术的发展,系统工程的文档从过去的纸质方式发展到电子化的处理方式,比如Word、PDF等电子格式,这只是便利了存取、复制、修改,其编码格式依然是基于文本的,各方人员从文档中读取信息依然是逐行扫描方式。对于相关各方对文档的内容形成共同一致的理解并没有根本改观。也就是说,TSE实际上并没有充分地利用信息技术的进步和成就。因此,传统的系统工程就是以文档为中心的系统工程。

2 MBSE的概念和内涵

在2007年,国际系统工程学会(INCOSE)在系统工程2020年愿景中给出了基于模型的系统工程的定义。基于模型的系统工程(Model Based System Engineering, MBSE)是对系统工程活动中建模方法应用的正式认同,以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动,这些活动从概念性设计阶段开始,持续贯穿到设计开发以及后来的所有的寿命周期阶段。从MBSE的定义可见,建模就是运用某种建模语言和建模工具来建立模型的过程,仿真是对模型的

实施与执行。模型是我们思考问题的基本方法,是设计工作的思维基础。实际上,各专业学科及系统工程一直在使用建模与仿真方法,MBSE并不是对建模方法的首次采用,也就是说,MBSE与传统系统工程的差别并不在是否采用建模方法。基于模型的系统工程开发方法中涉及到的关键技术有系统架构设计、多物理领域建模、集成的仿真计算环境、模型和数据的管理。

(1)系统工程的关键在于构建1个系统架构模型。在整个系统工程工作过程中,不仅要在头脑中建立关于该系统的全面的概念,而且在现实中要针对这个概念建立某种类型的模型,如草图、文字描述、表格、图片、图示、实物模型等,这些模型统称为工件,是人们自己思考与与他人沟通交流的工具。现实中工件和头脑中的概念相互启发,不断深化和具体化,最终变成生产人员可以使用的蓝图,再由生产人员把蓝图变成最终交付的系统。这实际上是所有设计工作的一般流程,并非系统工程所独有,只是系统工程需要考虑的因素更多包含了在设计过程中,需要从各方面建立模型来对该系统进行详细刻画,才能准确、全面地描述系统。

比如修建1座大厦时要画出立面图、管道图、电气图、楼层分布图等,这些称为系统的视图,分别对应相关的专业学科、不同的工作角色及不同的利益相关者。系统的视图实际上是从不同方面描述刻画了系统的某方面特征。因此,系统的各视图要紧密关联、保持一致,才能够保证最终的系统是正确、优化的。其中系统架构模型的建立至关重要。系统架构模型是对系统整体、全面的描述,相当于总体设计方案,是整个研制工作的首要工件,系统架构模型与各视图相互关联,各方人员针对共同的系统架构模型来分析和优化。因此,系统工程的关键在于构建出1个完整的系统架构模型。

(2)基于模型的系统工程用系统建模语言构建系统架构模型。在MBSE方法中,用系统建模语言来描述系统架构模型,作为系统开发全过程中首要的工件,并且对其进行管理、控制,并和系统技术基线的其它部分进行集成。用面向对象的图形化、可视化的系统建模语言描述系统的底层元素,进而逐层向上组成集成化、具体化、可视化的系统架构模型,增加了对系统描述的全面性、准确性和一致性。借助相关的软件环境及模型和数据交换标准,可以对系统架构模型进行存取操作:系统架构模型存储在1个共同的数据库中,相关参数之间自动关联。各学科的专业工程师、各

种角色都可以基于这个系统架构模型来工作。从共同的数据库中取数,并用本学科模型及软件工具来分析^[2]。要实现上述目的,MBSE需要相应的理论基础、建模语言及工具,包括来自软件工程领域的面向对象的分析与设计思想、系统建模理论、系统建模语言、扩展标记语言元数据交换标准(XMI)、系统工程数据的交换标准(AP233)等。基于模型的系统工程是开发和维护高复杂系统的关键,其提供支持系统需求分析、功能分析、架构设计、需求确认和验证活动所需的形式化建模方法和模型执行手段^[3]。MBSE使得复杂系统由多系统架构逐渐综合形成 SoS 架构。其模块化、可更换的架构元素提供了最好的价值和互操作性,架构元素的重用为跨产品线的一致性提供了保障。MBSE引入了综合系统模型的概念,通过系统用例、功能、时序、状态、架构和接口等模型全面反映系统各方面的属性信息(包括要求、性能、物理结构、功能结构、质量、成本和可靠性等),为系统工程人员提供1种以图形化的系统建模语言(Systems Modeling Language, SysML)为基础的系统行为描述的规范,对系统的各种需求进行可视化的表达和分析,确保不同专业、不同学科、不同角色的工程设计人员基于同一模型快速准确理解、识别、定义、分析、确认、分配需求^[4]。该方法论强调在产品开发周期的早期阶段,就着手翔实地定义系统的需求与功能,并进行设计综合和系统验证,其输入是利益攸关者需求。再经过需求分析、系统功能分析和设计综合,输出系统需求规格、产品规范、ICD以及系统之下1个或多个层级元素对应的子系统模型。基于模型的系统工程方法论强调“场景驱动”的需求捕捉和分析,通过模型执行实现需求的确认和验证,并在流程执行过程中实现需求的跟踪管理,并使用规范的建模语言,实现从系统工程到软件工程及其它专业工程的无缝衔接^[4]。

3 国外 MBSE 发展情况

近年来,国际领先的航空企业在积极实践和推进 MBSE。例如,空客公司在 A350 系列飞机的开发中全面采用 MBSE,在飞机研制中逐层细化需求并进行功能分析和设计综合,不仅实现了顶层系统需求分解与确认,也实现了向供应商、分包商的需求分配和管理。洛克希德·马丁公司采用 MBSE 来统一进行需求管理和系统架构模型,并向前延伸到机械、电子设备以及软件等的设计与分析之中,如:基于 MatLab 的算法分析以及 System C、Verilog、ANSYS 的软硬件的设计与分析、Adams 的性能分析、SEER 的成本分析等,构建

了完整的基于模型的航空和防务产品的开发环境^[5]。罗克韦尔-柯林斯公司采纳 MBSE 方法覆盖航电全领域的系统定义和系统测试模型。RR 公司依据 INCOSE 系统工程手册制定了其自身的系统工程能力框架,涵盖了系统思考、需求管理、系统定义、接口管理、系统功能分析、系统架构设计、确认和验证等能力,覆盖了总工程师、项目管理者、总设计师、系统工程师、系统设计师、开发工程师、质量工程师、服务工程师等岗位职责,实现了从航空动力系统到子系统到部件的系统工程迭代。波音公司构建了以任务和需求定义、逻辑和功能集成、功能和逻辑架构设计为核心的覆盖产品全生命周期的 MBSE 过程,从运行概念到需求到设计到生产^[6]。

NASA 在多个新的及已有的项目上积极运用 MBSE,其目的是显著提升项目的经济可承受性、缩减开发时间、有效管理系统的复杂性、提升系统整体的质量水平。软件工具提供商也在积极行动。IBM 公司也开发了1种方法论,称为针对系统工程的统一软件过程(MDSD)软件提供商积极开发相关支撑平台^[7]。如 LMS 公司的多领域系统仿真集成平台,可用于飞机开发的每个阶段(从前期的概念设计分析、详细设计到产品验证)^[7]。

4 当前存在的现实问题

随着系统的规模和复杂程度的提高,传统的基于文档的系统工程将产生大量的各种不同的文档,其面临的困难越来越明显:

(1)信息的完整性和一致性以及信息之间的关系难于评估和确定,因为其散布于各种不同的数量巨大的文档中^[8]。

(2)难以描述各种活动。活动是动态的,有交互的,仅用文字描述对于相对简单,参与方不多的活动还能胜任,但对于复杂活动就很难描述清楚。

(3)更改的难度很大。由于文档数量巨大,要确保更改所有需要更改的内容,是1项很难很大的工程。

(4)传统的系统设计方法依赖文档形式的需求管理。在形成需求后开发系统架构,并由设计师人工建立设计结果与需求之间的链接关系。如果出现不满足需求的情况,必须作出更改并重新建立链接关系。这一迭代过程随着设计进程的推进会在顶层设计、子系统设计和设备级设计层次不断重复。经验表明这一方法存在周期长、验证需求符合性困难、系统间接口不明确以及更改流程复杂耗时等诸多问题^[9]。

(5)飞机整机的设计面临新的问题:一方面是系

统本身越来越复杂,特别是随着多电飞机的发展,智能控制系统的采用越来越多,使得在传统开发流程中如何有效地考虑机电一体化系统开发,特别是在开发阶段如何综合地考虑控制系统和受控对象的耦合成为开发的关键之一;另一方面是不同研发部门或供应商的系统如何集成,特别是在设计的早期如何通过系统的集成确保系统设计的成熟性是全球航空行业产品开发面临的棘手问题。

5 MBSE 的优势

基于模型的系统工程就采用模型的表达方法来描述系统的整个生命周期过程中需求、设计、分析、验证和确认等活动。基于模型的系统工程的出现就是为了解决基于文档的系统工程方法的困难,相对于基于文档的系统工程方法,主要在以下几个方面有所改进:

(1)知识表示的无二义性。文字的描述经常会因为个人理解的差异而产生不同的解释,团队成员针对文档在大脑中形成的构思模型不可能完全一致。而模型是1种高度图形化的表示方法,具有直观、无歧义、模块化、可重用等优点,建立系统模型可以准确统一地描述系统的功能、详细规范与设计等方面,对整个系统内部各细节形成统一的理解,尤其是可以提高设计人员和开发人员之间的理解的一致性。系统模型是1种最佳实践方法,可以保证团队成员对此有相同的理解,为解决问题和改进系统提供基础。

(2)沟通交流的效率提高。随着系统的规模和复杂程度的提高,各种文档越来越多,相对于厚厚的技术文档,阅读图形化的模型显然更加便利直观、无歧义,使得不同人对同一模型具有统一一致的理解,有利于提高系统内需要协调工作部门之间的沟通与交流的效率,如顾客、管理人员、系统工程师、软硬件开发人员、测试人员等^[9]。

(3)系统设计的一体化。由于系统模型的建立涵盖系统的整个生命周期过程,包括系统的需求、设计、分析、验证和确认等活动,是1个统一整体的过程,可以提供1个完整的、一致的并可追溯的系统设计,从而可以保证系统设计的一体化,避免各组成部分间的设计冲突,降低风险。

(4)系统内容的可重用性。系统设计最基本的要求就是满足系统的需求并且把需求分配到各组成部分,因此建立系统的设计模型必然会对系统的各功能进行分析并分解到各模块去实现,从而对于功能类型相同的模块不必重复开发^[9]。

(5)增强知识的获取和再利用。系统生命周期中

包含着许多信息的传递和转换过程,如设计人员需要提取需求分析人员产生的需求信息进行系统的设计。由于模型具有的模块化特点,使得信息的获取、转换以及再利用都更加方便和有效。

(6)可以通过模型多角度的分析系统,分析更改的影响,并支持在早期进行系统的验证和确认,从而可以降低风险,减少设计更改的周期时间和费用。与其他工程学科(软件、电子等)一样,系统工程正在进化:从基于文档的方法到基于模型的方法,而这也正是系统工程发展的必然趋势^[9]。

(7)MBSE 和 TSE 的区别就在于系统架构模型的构建方法和工具的不同,以及由此带来的工作模式、设计流程等方面的区别。也就是说,传统的系统工程变成基于模型的系统工程,实际是从基于文本向基于模型的转变。这个模型是指用系统建模语言建立的系统架构模型,或者说是系统架构模型的建模语言从自然语言(文本格式)转向了图形化的系统建模语言(SysML)。但 MBSE 并没完全抛弃过去的文档,而是从过去以文档为主模型为辅向以模型为主文档为辅的转变。

(8)MBSE 可以更好地支持 V&V(Verification and Validation),由于引入了很多的工具软件,借助工具软件的优势,可以大幅提高测试与验证的效率与正确性。同时可以提高测试与验证的自动化水平,降低人工手动测试与验证的低级错误,并提高效率。

(9)MBSE 有助于进一步突破时间和空间对设计工作的限制。TSE 下相关的设计工作要遵循一定的时间顺序,而且还有一定的空间限制。比如:系统工程文档要按照一定的顺序进行流转,上一个专业学科分析做完之后,才能够进行下一个专业的分析,而且做出样机后各方才能进行测试等^[11]。MBSE 下用系统建模语言构建出模型后,就能进行各种分析和测试,提前协调、平衡和优化。而且各方围绕着1个存储着系统架构模型数据的数据银行并行开展工作,并且可以支持远程及分布式的工作模式,突破设计人员地理位置的限制。

6 MBSE 未来发展面临的挑战

(1)MBSE 的推进需要行政干预。基于模型的系统工程的推进需要付出巨大努力,并且不是所有系统

成员都渴望 MBSE 的推进。对于一些人来说,建立模型并且验证模型纯粹是浪费时间,与其花费巨大的时间建模与验模,还不如省下时间开发新产品。很多诸如此类的观念是短时间内很难改变的,需要行政力量去干预并且改变这种观念。基于模型的系统工程是 1 种新的工作方法,需要完全改变以前的工作习惯。这其中的阻力之大可想而知。

(2)工具集的集成。每个复杂的系统,都会涉及到很多工具软件,每个领域会有 1 种专门工具。对于系统工程来说,没有 1 种工具适用所有领域。比如,在功能与逻辑层,可以采用某种多用途仿真工具即可,但对于物理层建模,就需要其他工具。由于使用了多种不同的工具,首先就会增加针对不同工具的维护与培训费用^[4]。其次,更大的风险在于数据如何在多种工具之间进行转换,同时不可忽视的是,在数据转换时会产生大量的不可预知的错误。不同工具之间数据接口的设计与数据交互也是非常困难。最后,不同工具软件的联合在系统层面的仿真是需要真正面对的难题。

(3)系统开发向大型化、复杂化发展。航空系统产品日益庞大复杂,复杂度日益上升,包含的功能越来越多,但是系统组件却越来越少。同时,软件在系统中占的比重越来越大,这就增加了对完整产品需求定义的难度。对于复杂大系统的要求是减少部件数量、提高每个系统部件的能力、部件之间可以松散耦合与紧密集成。只有按照这个要求才可以实现系统的高效运作,同时才能实现便于后续与维护与扩展^[3]。

7 结束语

MBSE 使用建立的模型并且仿真,经过 20 年的发展,已经取得了巨大成就。MBSE 有着诸多显而易见的优势,虽然未来的发展也有挑战,但挑战与机遇并存。MBSE 增加了前后端程序的花费,但是也增加了对多种领域工具软件的需求。总之,MBSE 是针对系统工程一系列解决方法中的最佳实践方法。这一方法依靠大型软件平台,建立各级别的需求与相应的系统方案元素的链接,并以图形化的方式展示设计者对系统的认识。因为摒弃了繁缛的文档管理方式,系统模型与需求之间的关系更加明确,系统更改造成的影响也更加透明。设计者之间通过易于理解的图形交流系统设计方案,减少了由误解造成的隐患。可执行的功能模型使得在设计的各阶段都能分析系统对需求的符合性,并验证系统需求是否符合利益相关方的原

始需求。

综上所述,基于模型的系统工程非常重要,从事 MBSE 的工作将大有可为。认真研究,积极引进、消化、吸收,形成具有中国特色的 MBSE,为中国国防实力和综合国力的提升夯实基础。

参考文献:

- [1] Estefan J A. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) methodologies[R]. INCOSE MBSE Initiative, 2008.
- [2] Henson Graves, Yvonne Bijan. Using formal methods with SysML in aerospace design and engineering [J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2011, 63(1):53-102.
- [3] Özlem Demirci. Development of Mbse/Uml maturity model [D]. Tekniska Jönköping School of Engineering, 2010.
- [4] Thomas Johnson, Aleksandr Kerzhner, Christiaan J J Paredis. Integrating models and simulations of continuous dynamics into SysML [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2012, 12(3): 1-11.
- [5] Mary Bone, Dr. Robert Cloutier. The current state of Model Based Systems Engineering: results from the OMGTM SysML request for information [C]// 8th Conference of Systems Engineering Research (CSER), 2010:13-20.
- [6] Dickerson C E. Model driven architecture for Model Based Systems engineering [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3228: 249-261.
- [7] 王良声,袁建华,陈红涛,等. 国外基于模型的系统工程方法研究和实践[J]. 中国航天 2012(11):52-57.
WANG Liangsheng, YUAN Jianhua, CHEN Hongtao, et al. Model Based System Engineering research and practice [J]. Aerospace China, 2012(11):52-57.(in Chinese)
- [8] 程磊.基于模型的系统工程与虚拟铁鸟解决方案[J].航空制造技术, 2013(3):100-102.
CHENG Lei. Model Based System Engineering and virtual iron bird solution [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (3): 100-102.(in Chinese)
- [9] Karban R, Andolfato L, Zamparelli M. Towards model reusability for the development of telescope control systems [C]// 12th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPS), 2009:22-35.
- [10] Bitá Motamedian. MBSE applicability analysis[J].International Journal of Scientific & Engineering Research, 2013, 4(2):1-7.
- [11] Bran Selic. Model-based software engineering: expected and unexpected challenges[R].Malina Software Corp.Canada, 2012.
- [12] James R van Gaasbeek. Model-Based System Engineering (MBSE)[C] // LA Mini-Conference ,2010:123-136.
- [13] Robert Karban, Michele Zamparelli, Bertrand Bauvir, et al. Three years of MBSE for a large scientific programme: report from the trenches of telescope modeling[R].New York:ESO:2012:1-15.

(编辑:张宝玲)